

유체계통 설계 유로의 압력손실계수 자료 적용성 평가
**Evaluation for the Applicability of Pressure Loss Coefficient Information
on Fluid System paths**

전원대, 심윤섭, 김성오

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

유체계통설계 개발에는 유로마다 압력손실 계수에 대한 값이 필요하게 되는데 기존 문헌 상에서의 계수 제시 범위를 벗어나는 유동조건 경우에 대한 기존 문헌자료의 적용성을 유동장 상세분석코드인 CFX를 이용하여 평가하였다. 이를 통하여 Reynolds수에 따른 적용 범위의 확장 가능성, 그리고 가능한 경우의 확장 적용방법의 조사를 시도하였다. 또한 유체계통설계 개발업무에 많이 활용되고 있는 Idelchik와 타 실험자료간의 일치 정도에 대한 평가도 아울러 수행하였다. 분석결과, 급작확장 유로의 경우에는 CFX와 Idelchik에 의한 값이 이론식 및 실험치와 상호 유사한 값을 확인하였으나 180°유동 방향 변경유로의 경우에는 CFX와 Idelchik 값 사이의 비가 4:1정도로 큰 차이를 보였다.

Abstract

In fluid system design, information on flow resistance such as a pressure loss coefficient is required for the flow paths of a system. In general, however, the information found in a literature is often limited in its applicable range. A study was made for investigating the possibility for expansion of the applicable range and the method for the expansion. For the investigation, the correlations in the Idelchik's book which is widely used in fluid system design were selected as the information from an open literature, and the flow conditions treated were flow paths with a 180 degrees turn and a sudden expansion. The pressure loss coefficients in the flow conditions were calculated by the code CFX which analyzes a flow field in details and also by an analytical approach. The calculated results were compared to the value in the Idelchik's book. The comparison showed that they are close to each other in the sudden expansion flow but there is a big difference between the Idelchik's value and the CFX value as much as 1:4.

1. 서론

원자로내의 계통 설계 개발에는 각종 유로에서의 압력손실 계수에 대한 값이 필요하게 된다. 이를 위해 지금까지는 주로 기존 문헌 상에 제시되어 있는 값을 활용하되 특히 기존 문헌 중 이론적 정보 및 실험적 접근 결과를 종합하여 각종 유동조건에서의 각종 유동조건에서의 손실계수치를 폭넓게 제시하고 있는 Idelchik[1]의 자료가 주로 활용되고 있다. 그러나 때로는 분석대상 조건이 기존 문헌에서의 제시 범위 밖을 넘어가는 경우가 발생하게 된다. 한 예이자 또한 본 연구의 출발요인이었던 경우가 바로 전열관 이중배치 SG 실험 장치 설계[2]에서 유동방향이 180° 바뀌는 유로의 압력손실계수가 필요한 경우이다. 구체적으로 보면 이에 대한 기존자료[1]에서는 Reynolds 수가 40,000 이상의 경우에만 값을 제시하고 있으나 실제 실험장치에서의 Reynolds 수는 이보다 낮은 영역의 값을 가지게 된다. 따라서 실험장치의 설계를 위하여 기존자료[1]의 Reynolds 수 영역보다 낮은 Reynolds 값의 영역에서의 압력손실 계수 값의 생산이 요구되고 있다. 이에 따라 기존자료의 적용 범위를 확장시키는 가능성의 평가로서, 유동장에 대한 일반적인 상용해석 코드인 CFX-4.4를 이용하여 기존 문헌인 참고자료 1이 압력손실 계수를 제시한 경우에 대한 압력손실 계수를 계산하여 Reynolds 수 적용 범위의 확장 가능성, 그리고 가능한 경우의 확장 적용 방법의 조사를 시도한다. 또한 이러한 작업을 바탕으로 계통설계 개발 업무에 많이 활용되고 있는 Idelchik[1]와 상세해석 코드 해석결과와 타 실험자료간의 일치 정도에 대한 평가도 아울러 수행한다.

본 연구에서 검토대상으로 삼은 것은 Idelchik[1]에서 제시하는 유로가 180° 바뀌는 형상과 급작확장 유로에서의 압력손실 계수이다.

2. 180° 유동방향 변경 유로에서의 저항 계수 조사를 위한 CFX 해석

2.1 대상 및 방법

2.1.1 해석 영역의 형상 및 격자계

전체형상은 Idelchik[1]이 제시하고 있는 형태로서 그림 1과 같이 동심축의 이중관에 끝부분에서 함께 합쳐지는 유로이다. 유체는 안쪽에 위치한 원형관 유로로 들어와 관의 끝부분에서 180° 방향을 전환하여 바깥쪽에 위치한 환형유로로 흐르게 되거나 또는 이의 역방향으로 흐르게 된다. 이러한 구조의 유로 중 가운데 위치한 관과 바깥쪽에 위치한 환형관에 관련된 사항을 본 연구에서는 각각 ‘중앙’ 및 ‘측면’으로 칭한다.

해석하고자 하는 형상은 주어진 자료에서 임의의 기준설정값과 기하인자의 구체적인 값을 표 1과 같이 정하였다.

격자계는 유동장에서 살펴보고자 하는 것이 벽면에 의한 효과보다는 전체유동장내에서 형상에 의한 손실을 살펴보고자 하였으므로 간단히 일정한 간격으로 설정하여 총 2,705개로 구성하였고 그림 2와 같다.

2.1.2 경계조건 및 유동조건

전체적인 형상을 고려하여 축대칭으로 2차원 해석을 시도하였다. 따라서 중심부분은 대칭조건으로 외벽 및 내벽은 No-slip 조건으로 설정하였다. 또한 중앙관 부분에서 유체가 유입 또는 유출될 때 그림 1의 (a)인 경우에는 중앙관 부분을 입구 영역으로, 측면 부분을 출구 영역으로 설정하였고 그림 1의 (b)인 경우에는 중앙관 부분을 출구 영역으로 그리고 측면 부분을 입구 영역으로 설정하여 계산하였다.

유동조건은 Idelchik[1] 자료에서 사용 가능한 Reynolds 수의 영역을 결정한 것 외에는 다른 조건이 없으므로 설계에서 사용하고자 하는 낮은 Reynolds 수 영역에서부터 자료에서 제시하는 적정영역인 높은 Reynolds 수 영역까지 몇 단계를 경우화하여 해석하였다. 내부유동이므로 Reynolds 수가 2,300 이하에서는 층류유동조건을 사용하였고 2,300 이상에서는 난류유동조건을 사용하였다. 또한 입구의 조건은 계산의 편의를 위해 균일속도분포조건을 사용하였으며 Reynolds 수 설정에 맞도록 속력을 계산하여 설정하였다. 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

유체가 중앙 및 측면으로 유입되는 각 종류에 대한 입구에서의 Reynolds 수에 따른 유동조건 및 속도조건을 표 2에 나타내었다. 여기서 실제의 경우에는 중앙관으로의 유입과 유출이 기준이므로 중앙관으로 유입될 경우에는 균일속도분포를 설정하므로써 Reynolds 수를 만족하도록 설정하였고 중앙관으로 유출시에는 측면관에서의 유입속도를 설정해야하는데 이 경우에는 유·출입 유량이 일정한 질량보존법칙에 의거하여 중앙관의 유입과 같은 유출 유량을 맞추므로 측면관의 유입속도를 계산하였다. 또한 계산조건은 정상상태 및 단열조건이며 사용된 유체는 납-비스머스 합금인 Wood metal로서 물성치는 표 3에 나타나는 바와 같다.

본 해석 결과는 Mass residual 기준으로 최소 절대오차를 10%안에 들어가도록 하였다.

2.2 해석결과 분석

먼저 CFX 해석결과의 개념을 정의해보면 각 필드에서 계산된 압력과 속도의 영향을 고려하여 다음과 같은 식 (1-a)와 (1-b)에 의해 각각의 전압력(Total pressure)을 구하였는데 각각의 곡관을 진입하기전의 직관과 곡관을 통과하고 난 다음의 직관에서 각각의 중앙관과 측면관에서의 같은 x지점(x의 정의 : 입·출구에서부터의 거리로 입·출구점에서 $x=0$ 이 되고 중앙관과 측면관이 합쳐지는 곳으로의 방향이 '+'임)에서 유로단면의 평균압력을 구하였고 그 대표값의 차를 이용하여 식(1)에서 압력 손실계수를 구하였다. (그림 1-(a)의 경우는 p_1 이 중앙관 압력이고 p_2 는 측면관 압력이며 그림 1-(b)의 경우는 p_1 이 측면관 압력이고 p_2 가 중앙관 압력이 된다.)

$$\zeta = \frac{\Delta p}{\rho V_0^2 / 2} = \frac{p_1 - p_2}{\rho V_0^2 / 2} \quad (1)$$

$$p_1 = \frac{\rho v_1^2}{2} + p_{1s} \quad (1-a)$$

$$p_2 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_{2s} \quad (1-b)$$

본 유로에서의 압력손실요소는 직관유동에 의한 요소와 180° 유동방향변경에 의한 요소로 구성되는데 본 작업의 검토대상은 후자에 의한 압력손실이므로 이 요소에 의한 압력손실계수의 값을 CFX 계산 결과로부터 다음과 같이 구한다. CFX 계산 결과인 그림 3~5의 압력손실계수분포에서, x=0에서 x의 증가에 따라 계수가 비교적 선형으로 감소하는 구간과 이후의 요동과 절편구간으로 그 분포가 구성되는데 초기의 선형구간이 바로 직관유동에 의한 손실계수분 K_{pipe} 이고 요동 및 절편구간이 바로 180° 유동방향변경분이다. 따라서 직관 유동 구간의 계수 분포를 선형화하여 이 선형화된 분포 직선이 x=0.65 (180° 유로변경이 끝나는 지점 또는 시작되는 지점)에서 갖는 값이 바로 유동방향변경분 K_{geom} 이 된다.

이러한 해석결과는 중앙관으로 유체가 유입되는 경우와 중앙관에서 유체가 유출되는 경우를 나누어 살펴본다. 또한 중앙관에서 유출될 경우에는, 이 경우와 체반조건이 동일하며 단지 유동방향만 다른 경우인 중앙관으로 유입될 때의 해석결과에서 Reynolds 수가 50,000 이상이 되면 Reynolds 수가 압력손실계수에 미치는 영향이 미미한 것으로 나타나기에 Reynolds 수 50,000 까지만 계산이 이루어졌다. 또한 Idelchik[1]에서는 Reynolds 수가 40,000 이상에서의 결과만을 제시하고 있으나 본 해석에서는 층류유동 조건인 경우와 난류유동 조건이지만 Reynolds 수가 40,000 이하인 경우 그리고 Reynolds 수가 40,000 이상인 난류유동 조건인 경우 이렇게 세 부분으로 나누어서 살펴본다.

2.2.1 중앙관으로 유체가 유입되는 경우

먼저 그림 3에서는 층류유동에서의 압력손실계수 변화를 나타낸 것이다. Reynolds 수가 작을수록 압력손실계수값이 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 유동이 매우 느리게 일어나므로 인해서 직관저항부의 영향이 상대적으로 커지기 때문에 이 부분의 손실계수값이 커짐을 볼 수 있다. 따라서 그림 3에서 선형화된 그래프를 살펴보면 Reynolds 수가 500일 경우에 중앙관과 측면관이 합쳐지는 부분에서의 K_{geom} 의 값은 1.76로 나타나고 있으며 입구와 출구에서 즉 두 직관과 사이의 곡관을 통과한 전체 압력손실계수 값은 5.06의 큰 값을 가지는데 직관에 의한 압력손실계수값은 약 3.3정도이다. 따라서 낮은 Reynolds 수의 유동에서는 곡관에 의한 유동방향 변화에 의하여 나타나는 압력손실보다는 직관에서 길이에 따른 압력손실이 더 크며 이것은 Reynolds 수가 증가할수록 그 값이 점차 줄어 든다.

그림 4에서는 난류유동영역으로 들어섰지만 Reynolds 수가 40,000이 안되는 경우에서의 압력손실계수 변화를 나타내었다. 전반적인 경향은 직관을 거쳐가면서 압력이 일정하게 감소하면서 곡관을 전후해서 한번의 압력손실계수 값이 증가했다가 감소하는

요동하는 모습을 살펴볼 수 있다. 선형화된 그래프를 살펴보면 직관에 의한 관유동저항 압력손실계수 값 K_{pipe} 가 줄어들어 약 2.6정도의 값을 가진다. 곡관인 유동방향변경에 의한 형상저항 압력손실계수 K_{geom} 이 1.6정도의 값으로 일정해진다.

그림 5에서는 난류유동이며 Idelchik[1]에서 제시하고 있는 유동조건과 동일한 Reynolds 수가 40,000 이상에서의 압력손실 계수 변화이다. 결과에서 압력손실계수의 값이 그림 5에서 살폈던 바와 같이 곡관을 전후로 해서 압력손실계수가 증가했다 감소하는 요동을 보이고 있다. 그리고 Reynolds 수가 커질수록 압력손실계수는 더 이상 내려가지 않고 1.5와 2 사이에서 일정해 지는 것을 볼 수 있다. 선형화된 그래프에서 살펴보면 그 기울기가 '0'에 점점 가까이 가며 일정한 값을 나타내는 데 Reynolds 수가 100,000을 넘어가면서 직관에 의한 압력손실은 상대적으로 거의 없다고 볼 수 있다.

여기에서 Idelchik[1]에서 제시하는 값과 비교하면 중앙관으로 유체가 유입될 경우의 곡관에서 유동방향변경에 의한 형상저항 압력손실계수 K_{geom} 가 0.43인데 비하여 그림 6에서 보이는 결과에서는 K_{geom} 가 거의 1.75정도의 평균값을 가지는데 이는 Idelchik[1] 값의 약 4 배 정도 큰 값을 가진다.

2.2.2 중앙관에서 유체가 유출되는 경우

그림 6에서 보면 중앙관으로 유체가 유출될 경우에도 중앙관으로 유체가 유입되는 경우와 비슷하게 x지점에 따라 곡관에 가까워갈수록 압력손실계수값이 작아지면서 비교적 큰 값의 변화를 보이고 있다. K_{geom} 가 약 5정도의 값을 가진다. 이것은 중앙관에서 유입될 경우보다 약 3배 정도 큰 값을 가진다.

그림 7에서 보면 중앙관으로 유체가 유입되는 경우보다 좀더 빨리 완만해지는 경향을 보이긴 하지만 압력손실계수 값은 전체적으로 큰 값을 가진다. 또한 난류 유동으로 되면서 곡관의 전·후에서 나타나는 압력손실계수 요동현상도 유사하게 나타나고 있다. K_{geom} 가 2.9 정도이다.

그림 8에서는 Reynolds 수가 50,000에서의 경우만 제시하였지만 Reynolds 수가 50,000 이상에서는 앞에서 언급한 것과 같이 이와 비슷한 경향을 예측할 수 있다. 결과를 살펴보면 압력손실계수가 2.5에서 3사이의 영역에서 다소 변화가 줄어들면서 나타나는 것을 살펴볼 수 있다.

Idelchik[1] 자료에서 에서 제시하는 압력손실계수 0.70에 비하여 유동방향변경에 의한 형상저항 압력손실계수 K_{geom} 이 약 2.8 정도로 다소 큰 값을 예측하고 있으나 중앙관으로 유체가 유입되는 경우와 마찬가지로 Idelchik[1] 값의 4 배 정도의 큰 값이다.

하지만 전반적인 압력손실계수값은 Idelchik[1] 자료에서 나타나는 값에서 보이는 경향과 마찬가지로 중앙관으로의 유출할 때의 압력손실계수 값보다 중앙관으로 유입될 때의 압력손실 계수 값이 큰 경향을 가지고 있는 것을 확인하였다.

2.2.3 각 경우에 대하여 Reynolds 수에 따른 평가

앞의 결과들을 각 경우에 대하여 또한 Reynolds 수에 따른 압력손실계수값들을 정리하면 그림 9가 되는데 Reynolds 수가 증가함에 따라 압력손실계수값이 일정해진다. 특히 Reynolds 수가 Idelchik[1]가 제시하고 있는 40,000이상에서는 일정해지는 현상이 두드러진다. 즉 압력손실계수값이 Reynolds 수가 증가하면서 특히 40,000이상에서 일정한 것을 볼 때 속도분포가 압력손실에 영향을 주는 것은 비교적 적다고 할 수 있다.

2.2.4 종합

유체가 증양관을 통하여 유·출입하는 두 경우 Reynolds 수 및 유동방향에 따른 압력손실의 특성이 파악되었고 형상압력손실 계수 값에서는 Idelchik[1]가 제시하는 압력손실 계수 값보다 CFX 해석을 통한 값이 4배 크게 나타났다. 하지만 CFX 해석에 있어 계산 결과의 신뢰성을 부정할 만한 요소가 없고 이를 확인할 만한 다른 자료의 부재로 인하여 어느 것이 옳은지에 대한 평가가 곤란하므로 추가 작업의 필요가 있다.

3. 확장유로에서의 손실계수 조사

CFX와 Idelchik[1] 자료의 신빙성을 조사하기 위하여 해석적 접근 방법이 기본적으로 가능하고 또 실험자료가 있는 유동경우인 급작확장 유로 경우의 압력손실 계수에 대하여 적절성을 평가하였다.

3.1 확장유로에 대한 CFX 해석

CFX 해석 대상 경우로 여기서도 역시 Idelchik[1]에서 압력손실계수 값을 제시하고 있는 기하형상 및 유동조건 경우를 설정하였다.

3.1.1 기하형상 조건

전체형상은 일반적인 급작확장 유로 형태로 그림 10과 같이 나타난다. 급작확장 유로의 경우 Idelchik[1]에서는 유로 단면의 면적 비와 입구에서의 속도분포의 함수로 나타내고 있으므로 CFX 해석에서는 유로 단면의 면적비를 0.3으로 두고 속도분포를 달리 하며 계산을 수행하였다.

3.1.2 유동 조건

Idelchik[1]에서는 입구 속도 분포에 따른 효과를 제시하고 있는데 이 분포를 다음 식(2)와 같이 묘사하고 있다.

$$\frac{w}{w_{\max}} = \left(1 - \frac{y}{R_0}\right)^{1/m} \quad (2)$$

식(2)에서 m에 따라서 속도 분포가 달라지게 되는데 m=1인 삼각형태의 속도분포

형태에서부터 m 이 증가하여 $m=\infty$ 인 균일속도분포 형태가 된다. 이에 따라 CFX 해석에서도 이와 동일한 입구속도분포 함수를 사용하였다. 해석의 용이함을 위하여 입구조건에서 w_{\max} 를 5로 일정하게 두고 m 을 증가시키면서 계산하였다. 따라서 m 의 증가는 유량의 증가와 함께 Reynolds 수의 증가를 가져오지만 이에 대한 압력손실의 영향은 없다.

3.1.3 해석결과

해석결과는 그림 11과 같이 m 이 증가할수록 압력손실계수의 값은 점점 작아진다. 또한 길이 방향에 따라서도 어느 정도 거리가 멀어지게되면 압력손실계수값이 일정해진다.

그림 12에서는 단면면적비가 0.3인 경우에서 Idelchik[1] 값과 CFX 해석값을 비교한 그래프를 나타내었다. 다소 값의 차이는 있으나 속도분포 계수 m 이 증가함에 따라서 압력손실계수값이 줄어드는 비슷한 경향을 보이는 것을 살펴볼 수 있다. 그리고 $m=\infty$ 인 균일속도분포에서는 거의 같은 압력손실계수값을 예측하고 있다.

3.2 이론적 해석

자세한 비교를 위하여 참고문헌 3에서 제시하고 있는 Momentum balance 식을 이용한 결과를 비교한다.

Momentum balance에 의한 압력손실계수를 구하기 위하여 참고문헌 3에서는 두 가지 가정을 하는데 첫째는 입구와 출구(그림 10에서 0과 2 지점)에서의 속도는 균일하다는 조건으로 실제 유동에서는 출구부분에서의 균일속도분포가 나오지 않을 수 있다. 하지만 이러한 것을 고려하더라도 압력손실계수값에 미치는 영향은 수계산을 통하여 미미함을 확인하였다. 두번째 가정은 전체유동장이 고 Reynolds 수 유동이므로 벽면의 전단응력 효과는 무시하는 것이다.

위의 두 가정을 통하여 입구에서의 압력과 급작확대지점(그림 10에서 0과 1지점)의 압력이 같은 경우의 압력손실 계수 K 는 다음과 같이 식 (3)이 된다.

$$K = 2 \left[\left(\frac{D_0}{D_2} \right)^2 - 1 \right] \left[\left(\frac{D_0}{D_2} \right)^2 + \left[1 - \left(\frac{D_0}{D_2} \right)^2 \right] \right] \quad (3)$$

여기에 입구와 급작확장유로에서의 압력차이를 CFX 해석 결과를 고려하여 $p_1 = p_0 - 0.072(p_2 - p_0)$ 로 두고 계산하면 식(4)와 같이 나타난다.

$$K = \frac{2 \left[\left(\frac{D_0}{D_2} \right)^2 \left\{ \left(\frac{D_0}{D_2} \right)^2 - 1 \right\} \right]}{1 + 0.072 \left\{ 1 - \left(\frac{D_0}{D_2} \right)^2 \right\}} \quad (4)$$

식(3)과 (4)를 통하여 압력손실계수값의 이론값을 표현한다.

3.3 자료간의 상호비교

참고문헌 3에서 제시하는 실험값도 아울러 활용하여 비교, 검토 하면 그림 13와 같은 그래프가 나온다. 여기서 CFX의 결과는 앞에서 설명한 이론적 해석 조건에 맞도록 입구에서의 속도는 균일속도분포인 것을 고려하였고 출구영역은 $x=2$ 이후의 값을 사용하였다. 그림 13의 결과에서 살펴보면 유로 단면의 면적비가 0.3인 경우에 실험값과 이론식에 의해 계산된 값이 잘 일치하고 있고 CFX 해석 결과값과 Idelchik[1]이 제시하는 압력손실 계수값도 실험값과 이론식에 의해 계산된 값에 잘 일치하고 있다. 유로 단면의 면적비가 증가하면 실험값과 이론식에 의한 값의 차이가 보이고 있다. Idelchik[1]가 제시하는 값도 이론식에 의한 값에는 일치하고 있으나 실험값과는 차이를 보인다.

4. 결론

설계유로에서의 압력손실 계수 값을 설정하기 위한 방법을 검토하기 위하여 유동방향이 180° 바뀌는 경우와 급작확장 유로의 경우에 대하여 상용코드인 CFX-4.4 및 해석적접근과 실험치를 이용하여 압력손실계수를 평가하였다. 이에 본 연구에서는 결론은 다음과 같다.

- 평가결과 압력손실계수 자체 특성으로서는 180° 유동방향 변경 유로에서는 유동 진행방향에 따른 압력손실계수 값이 약 1.5배 정도 달라지고 Reynolds 수의 증가에 따른 형상 손실계수의 상대적 크기가 증가됨을 확인하였다.

- 급작확장 유로의 경우에는 CFX와 Idelchik[1]의 압력손실계수가 이론식 및 실험치와 상호 유사한 값을 타나내는 것을 확인하였으나 180° 유동방향 변경 유로의 경우에는 CFX와 Idelchik[1] 값 사이의 비가 4:1 정도로 큰 차이를 보였다.

- 이에 따라 계통 설계의 압력손실 계수 값 설정을 위하여는 CFX와 Idelchik[1]의 신뢰성에 대한 실험적 평가 등 추가적인 평가가 필요한 것으로 판단된다. 아울러 180° 유동방향 변경 유로의 경우에 압력손실계수 값을 추가적인 평가 이전의 CFX와 Idelchik[1]의 값 사용시에는 상당한 여유도를 두는 것이 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Idelchik I.E.의 Handbook of Hydraulic Resistance, 2nd Ed., Hemisphere Pub. Co., 1986
- [2] 심운섭, 전열관 이중배치 SG 실험요건 계산서, LMR/FS100-CN-01 REV.0/03, 한국원자력연구소, 2003
- [3] Stephen Whitaker, Introduction to Fluid Mechanics, Prentice-Hall, INC.,

표 1. 기준설정값 및 형상 결정인자

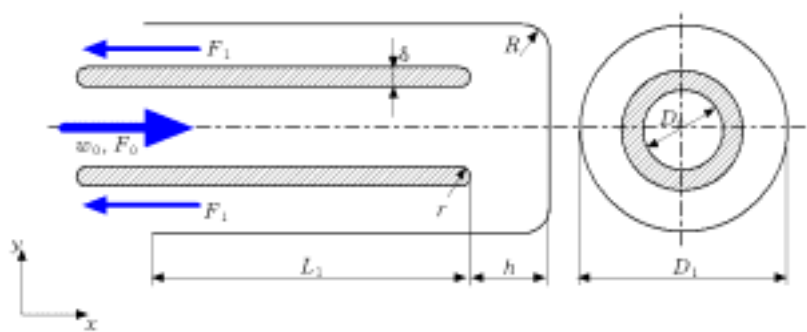
기준 설 정 값	$\bigcirc r/D_0 = 0.05$	내부직경	$D_0 = 0.15m$
	$\bigcirc h/D_0 = 0.6$	내벽 끝단 반지름	$r = 0.05D_0 = 0.0075m$
	$\bigcirc R/D_1 = 0.2$	내벽 두께	$\delta = 2r = 0.015m$
	$\bigcirc m = \frac{D_1^2}{D_0^2} = 2.05$	내벽과 외벽 끝단 거리	$h = 0.6D_0 = 0.09m$
	$\bigcirc L = L_1 + h = 5D_0$	Fillet 반경	$R = 0.2D_1 = 0.056m$
		유로 길이	$L = 5D_0 = 0.75m$
		외부직경	$D_1 = 0.28m$

표 2. Reynolds 수에 따른 입구 유동 조건

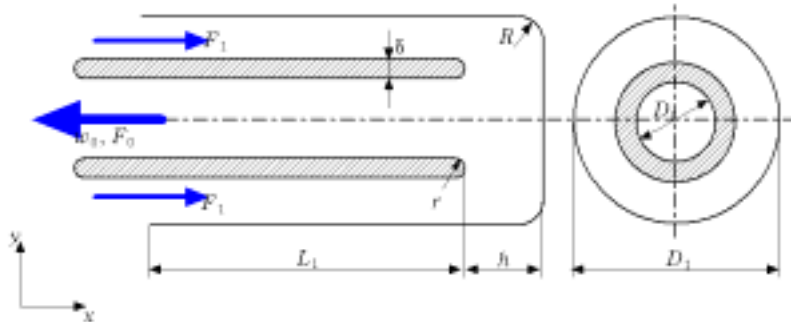
Reynolds			
100	$V_0 = 8.66 \times 10^{-5}$	$V_{in} = 1.3 \times 10^{-4}$	
500	$V_0 = 4.33 \times 10^{-4}$	$V_{in} = 6.5 \times 10^{-4}$	
1000	$V_0 = 8.66 \times 10^{-4}$	$V_{in} = 1.3 \times 10^{-3}$	
5000	$V_0 = 4.33 \times 10^{-3}$	$V_{in} = 6.5 \times 10^{-3}$	
10000	$V_0 = 8.66 \times 10^{-3}$	$V_{in} = 1.3 \times 10^{-2}$	
50000	$V_0 = 4.33 \times 10^{-2}$	$V_{in} = 6.5 \times 10^{-2}$	
100000	$V_0 = 8.66 \times 10^{-2}$		
300000	$V_0 = 2.6 \times 10^{-1}$		
500000	$V_0 = 4.33 \times 10^{-1}$		
700000	$V_0 = 6.066 \times 10^{-1}$		
1000000	$V_0 = 8.66 \times 10^{-1}$		

표 3. Wood metal(납-비스머스 합금)의 물성치

	$C_p = 180 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$
	$\rho = 9700 \text{ kg/m}^3$
	$k = 15 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$
Prantl	$\text{Pr} = 0.012$
	$\mu = 0.001261 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$



(a) 중앙관에서 유입되고 측면관에서 유출되는 경우



(b) 측면관에서 유입되고 중앙관에서 유출되는 경우

그림 1. 180° 유동방향 변경유로 형상

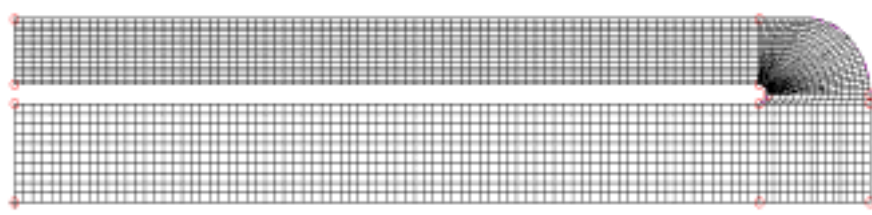
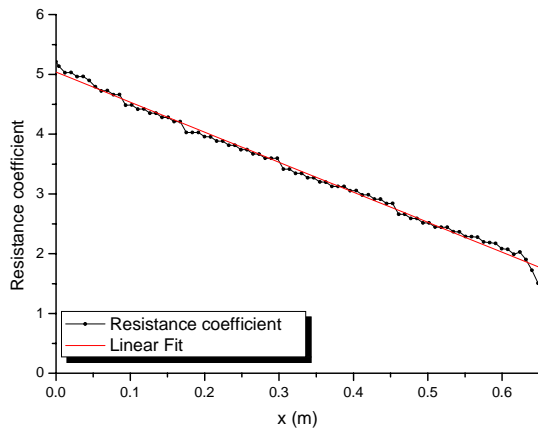
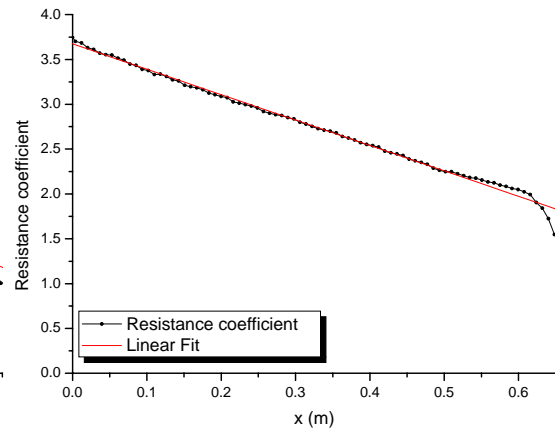


그림 2. 계산영역의 격자형상

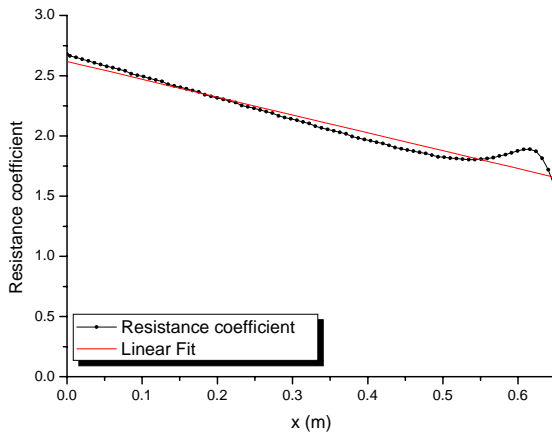


(a) $Re = 500$, $V_0 = 4.33 \times 10^{-4}$

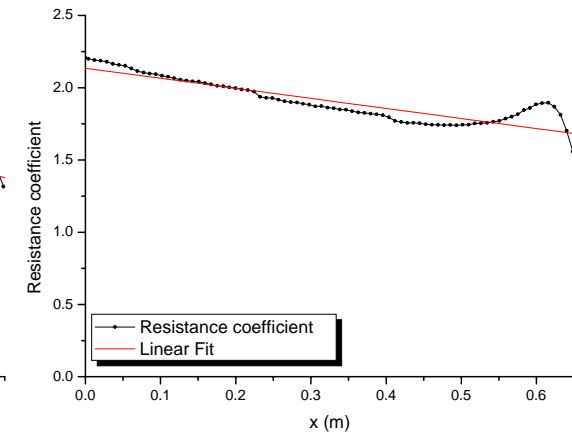


(b) $Re = 1000$, $V_0 = 8.66 \times 10^{-4}$

그림 3. 층류유동에서의 압력손실계수 그래프 [중앙관 유입]

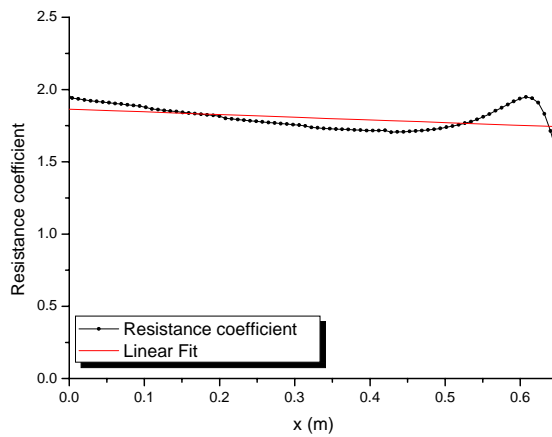


(a) $Re = 5000$, $V_0 = 4.33 \times 10^{-3}$

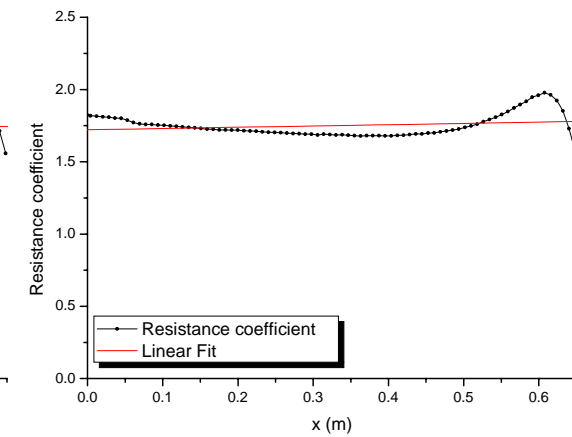


(b) $Re = 10000$, $V_0 = 8.66 \times 10^{-3}$

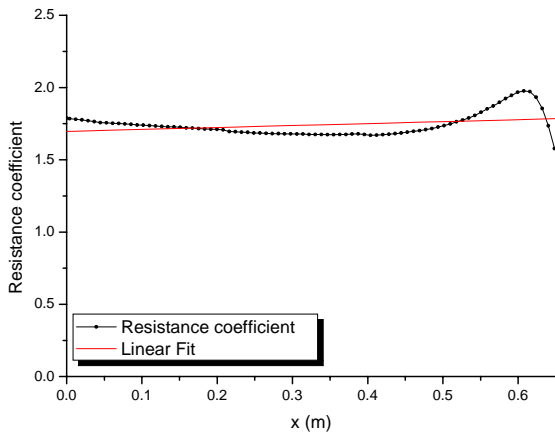
그림 4. 난류유동이고, $Re < 40,000$ 인 유동에서의 압력손실계수 그래프 [중앙관 유입]



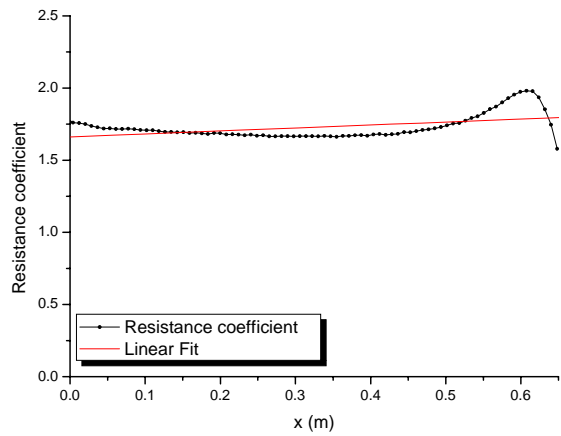
(a) $Re = 50000$, $V_0 = 4.33 \times 10^{-2}$



(b) $Re = 300000$, $V_0 = 2.6 \times 10^{-1}$

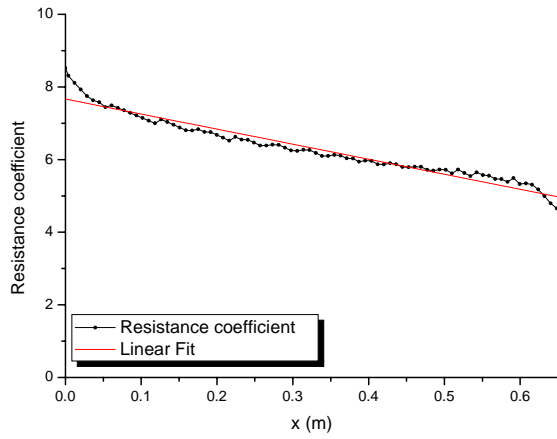


(c) $Re = 500000$, $V_0 = 4.33 \times 10^{-1}$

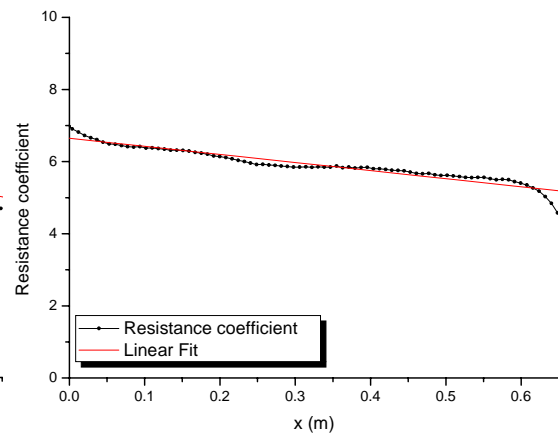


(d) $Re = 1000000$, $V_0 = 8.66 \times 10^{-1}$

그림 5. 난류유동이고 $Re \geq 40,000$ 인 유동에서의 압력손실계수 그래프 [중양관 유입]

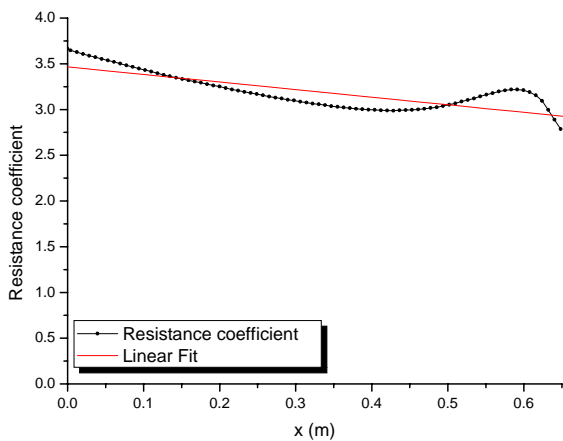


(a) $Re = 500$, $V_0 = 4.33 \times 10^{-4}$

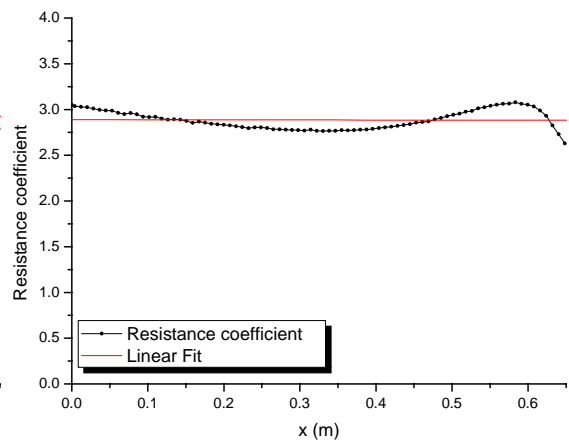


(b) $Re = 1000$, $V_0 = 8.66 \times 10^{-4}$

그림 6. 층류유동에서의 압력손실계수 그래프 [중양관 유출]



(a) $Re = 5000$, $V_0 = 4.33 \times 10^{-3}$



(b) $Re = 10000$, $V_0 = 8.66 \times 10^{-3}$

그림 7. 난류유동이고 $Re < 40,000$ 인 유동에서의 압력손실계수 그래프 [중양관 유출]

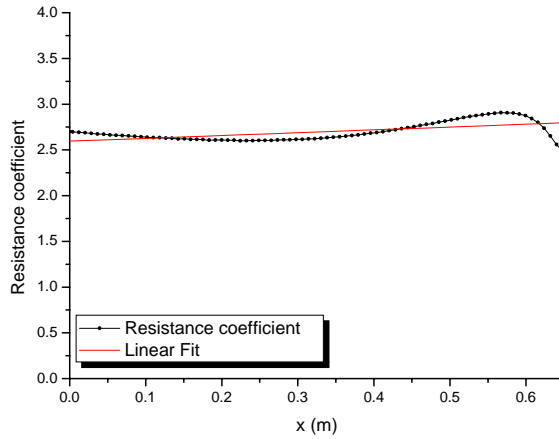


그림 8. 난류유동이고 $Re \geq 40,000$ 인 유동에서의 압력손실계수 그래프 [중앙관 유출]

$$(Re = 50000, V_0 = 4.33 \times 10^{-2})$$

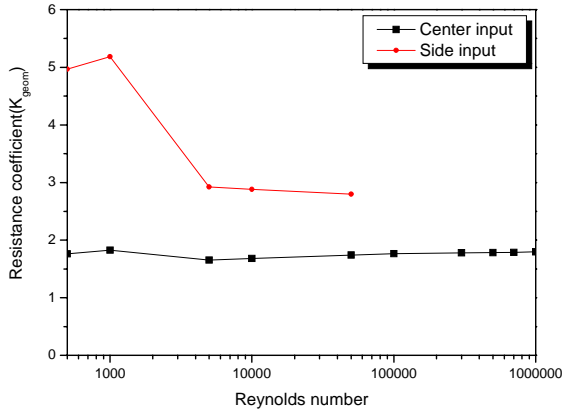


그림 9. Reynolds 수에 따른 압력손실계수

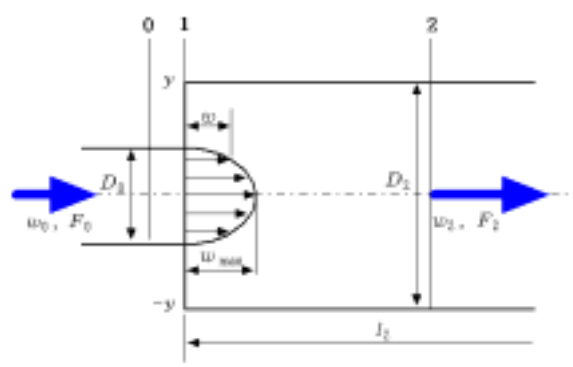
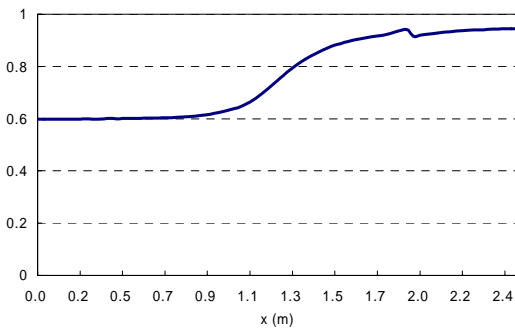
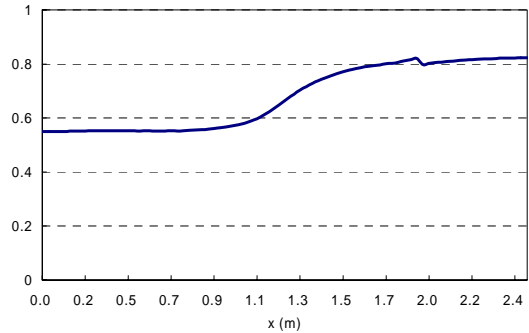


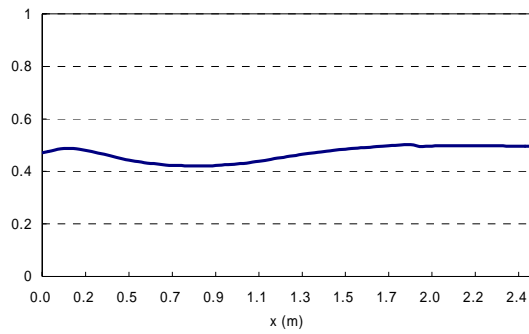
그림 10. 급작확장유로의 형상



(a) 입구에서 속도분포 개수 $m=1.0$ 인 경우



(b) 입구에서 속도분포 개수 $m=1.35$ 인 경우



(c) 입구에서 균일속도분포($m=\infty$)인 경우
 그림 11. 길이에 따른 압력손실계수 그래프

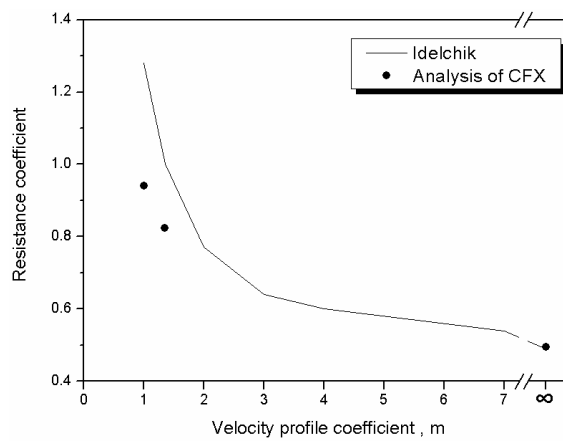


그림 12. 입구속도분포에 따른 압력손실계수 그래프

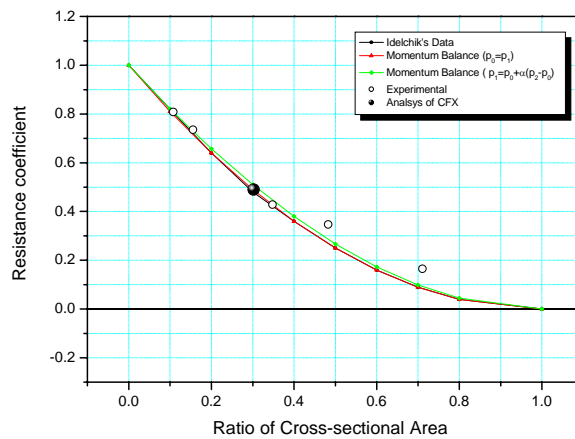


그림 13. 단면면적비에 따른 압력손실계수 그래프